

УДК 621.791.78

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ ТОЛСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

канд. физ.-мат. наук, доц. С.В. ШАЛУПАЕВ, Е.Б. ШЕРШНЕВ, Ю.В. НИКИТЮК, А.А. СЕРЕДА
(Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины)

Проведены экспериментальные исследования процесса лазерного разделения пластин из алюмооксидной керамики толщиной 10 мм с использованием лазерного излучения CO₂-лазера. Выполнен анализ термоупругих полей, формируемых лазерным излучением при лазерном термораскалывании керамических образцов.

Введение. Использованию процессов лазерного термораскалывания для прецизионной обработки хрупких неметаллических материалов посвящен ряд работ, из которых следует, что в настоящее время существует несколько методов высокоточной лазерной обработки, к которым относятся лазерное управляемое термораскалывание (ЛУТ) [1 - 3], параллельное и асимметричное лазерные термораскалывания [4, 5], термораскалывания изделий трубчатой формы [6].

Наиболее эффективным методом лазерного разделения хрупких неметаллических материалов является метод ЛУТ, основной отличительной особенностью которого является совместное воздействие на поверхность материала лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм и хладагента, подаваемого в зону обработки в виде воздушно-водяной смеси. К преимуществам ЛУТ следует отнести высокую точность разделения, его безотходность, высокую скорость и низкую энергоемкость, нулевую ширину реза и повышение примерно в два раза механической прочности получаемых изделий, по сравнению с другими традиционными способами резки [1].

Все вышеперечисленные методы достаточно широко применяются для обработки различных видов стекол, но не получили широкого распространения для обработки керамических изделий. Необходимо отметить, что изделия из керамики обладают целым рядом преимуществ по сравнению с изготовленными из металлов и полимерных конструкционных материалов, что определяется особенностями межатомного взаимодействия в химических соединениях, формирующих структуру керамики, которые обеспечивают высокие показатели упругости, твердости и сопротивления пластической деформации [7]. Однако именно эти свойства керамики создают трудности при ее обработке. В связи с этим представляется целесообразным разработка и исследование новых лазерных технологий обработки керамических изделий. Одним из важных направлений среди этих технологий является лазерная резка толстых керамических пластин.

В данной работе предложен способ лазерного термораскалывания толстых керамических пластин, являющийся модификацией известного метода ЛУТ и основанный на применении лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм.

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования были выполнены на лазерной установке обработки материалов [8], схематично представленной на рис. 1. На рис. 2 приведена схема расположения лазерного пучка и хладагента в плоскости обработки. Позицией 1 отмечен лазерный пучок с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм, позицией 2 отмечена зона подачи хладагента. В качестве образцов для исследования режимов лазерного разделения были использованы пластины из алюмооксидной керамики толщиной 10 мм. Лазерная резка керамических пластин выполнялась в соответствии с приведенной на рис. 2 схемой.

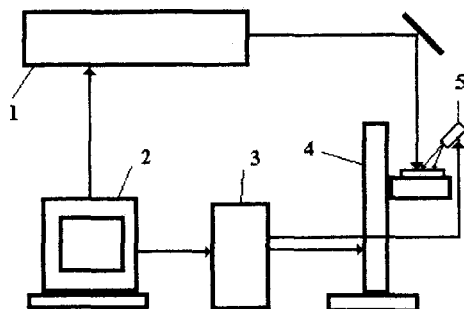


Рис. 1. Схема лазерной установки:
1 - CO₂-лазер; 2 - компьютер; 3 - блок управления;
4 - координатный стол; 5 - форсунка

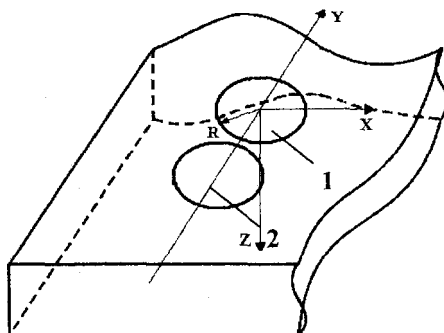


Рис. 2. Схема расположения лазерных пучков и хладагента в плоскости обработки

Обрабатываемое изделие перемещалось с помощью координатного устройства относительно неподвижно расположенного лазерного пучка 1 и форсунки, обеспечивающей подачу хладагента 2, в направлении оси Y . Лазерный пучок 1, поглощаясь в поверхностном слое, осуществляет нагрев пластины.

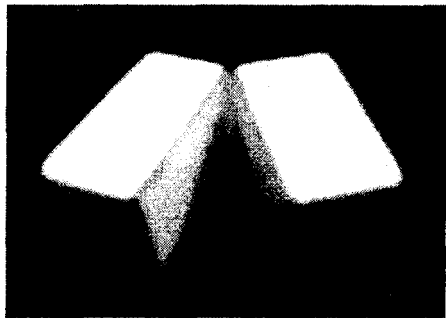


Рис. 3. Образцы алюмооксидной керамики, разделенной методом лазерного термораскальвания

Далее нагретая поверхность подвергается резкому охлаждению, попадая в область подачи хладагента.

Полученные экспериментальные результаты показывают возможность получения разделяющей микротрещины достаточно большой глубины для качественного механического докальвания в случае лазерной резки пластин из алюмооксидной керамики толщиной до 10 мм. На рис. 3 представлены образцы алюмооксидной керамики, разделенной методом лазерного термораскальвания.

Необходимо отметить, что существенным отличием разработанной технологии от уже известной технологии ЛГУТ является, то, что нагрев поверхностных слоев образца проводился до температур, превышающих температуру плавления алюмооксидной керамики. При этом последующее резкое охлаждение обеспечивает быстрое затвердевание расплавленных слоев, что в свою очередь приводит к формированию магистральной микротрещины.

Конечно-элементный анализ. В соответствии с приведенной выше моделью процесса лазерной резки толстых керамических пластин было выполнено конечно-элементное решение задачи о распределении термоупругих полей [9] в квазистатической постановке. Для определения термоупругих полей, возникающих при лазерном термораскальвании образца, вначале выполнялся расчёт полей температур.

Как известно, решение конечно-элементной задачи о нахождении термоупругих напряжений, формируемых в результате комплексного воздействия лазерного излучения и хладагента на материал, связано с минимизацией интегральной величины, зависящей от работы напряжений и внешней приложенной нагрузки [10], которая в случае моделирования лазерной обработки определяется расширением материала в зоне воздействия лазерного излучения и сжатием в зоне подачи хладагента. В расчетной программе была применена формулировка метода конечных элементов задачи термоупругости в перемещениях, требующая минимизации потенциальной энергии системы, при этом после определения перемещений выполнялось вычисление компонент тензоров деформаций и напряжений.

Для расчетов полагалось что, плотность керамики составляет 3960 кг/м^3 . Были учтены зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры [11]. Модуль упругости E принимался равным 380 ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,222$, коэффициент температурного расширения $\alpha = 80 \cdot 10^{-7} (1/^\circ\text{C})$. Расчеты проводились для следующих параметров лазерного пучка: радиус пучка $R = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; мощность излучения $P = 70 \text{ Вт}$. Расчеты проводились для пластины с геометрическими размерами $20 \times 20 \times 10 \text{ мм}$. Скорость относительного перемещения лазерного пучка и алюмооксидной керамики составляла 2 мм/с .

На рис. 4 представлены результаты расчета температурных полей, формируемых в исследуемом образце алюмооксидной керамики в результате лазерной обработки, а на рис. 5 – распределение напряжений σ_{xx} , действующих перпендикулярно плоскости деления.

Как видно из рис. 4, при выбранных параметрах обработки в зоне воздействия лазерного излучения температура достигает значений, соответствующих плавлению алюмооксидной керамики. При этом распределение изотерм, соответствующих максимальным значениям температуры, характеризуется сильной локализацией в поверхностных слоях, что объясняется интенсивным поверхностным поглощением излучения с длиной волны $\lambda 10,6 \text{ мкм}$.

Из анализа распределения полей напряжений σ_{xx} , приведенного на рис. 5, следует, что зарождение разделяющей микротрещины происходит в зоне расплава за счет напряжений растяжения, сформированных при затвердевании материала. Дальнейшее проникновение микротрещины вглубь образца осуществляется за счет растягивающих напряжений, сформированных вследствие подачи хладагента. При этом конечная глубина формируемой микротрещины определяется не столько распределением изотерм, соответствующих температуре плавления, и изолиний, соответствующих максимальным значениям напряжений растяжения, сформированных в зоне подачи хладагента, сколько областью сжимающих напряжений, опоясывающих зону растягивающих напряжений и сформированных лазерным пучком.

Таким образом, микротрещина формируется при затвердевании расплавленных поверхностных слоев керамики в результате интенсивного охлаждения, а конечная форма микротрещины зависит от

пространственного распределения зон растягивающих и сжимающих напряжений, сформированных соответственно хладагентом и лазерным излучением.

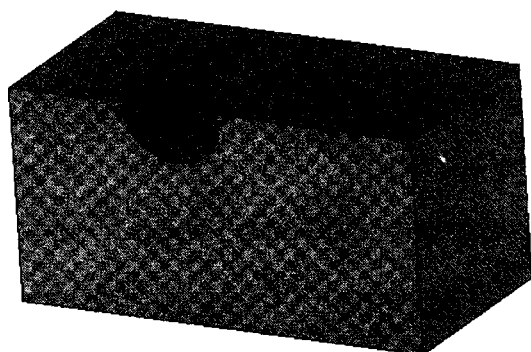


Рис. 4. Распределение температуры, К

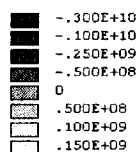
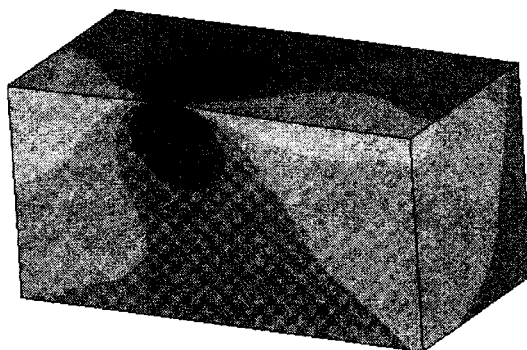


Рис. 5. Распределение напряжений σ_y , МПа

Выводы. Разработана технология термораскальвания толстых керамических пластин, отличающаяся от ЛУТ нагревом поверхностных слоев образца до температур, превышающих температуру плавления материала. При этом последующее резкое охлаждение обеспечивает быстрое затвердевание расплавленных слоев, что в свою очередь приводит к формированию магистральной микротрещины достаточно большой глубины для качественного механического докальвания в случае лазерной резки пластин из алюмооксидной керамики толщиной до 10 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Динамика формирования полей температурных напряжений в процессе лазерного управляемого термораскальвания / В.А. Емельянов, С.В. Шалупаев, Е.Б. Шершнев и др. // Лазерные новости. 1995.-С. 14-17.
2. Shalupaev S.V., Semchenko A.V., Nikitjuk Y.V. Silica gel glasses after laser radiation // Material Science. - 2003.-V. 21, №4.-P.495-501.
3. Лазерное термораскальвание диэлектрических материалов / С.В. Шалупаев, Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк и др. // CERAMICS. POLISH CERAMIC BULLETIN. - 2001. - V. 65. - P. 75 - 83.
4. Шалупаев С.В., Шершнев Е.Б., Никитюк Ю.В. Лазерное разделение стекла в плоскости, параллельной поверхности // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. - 2001. - №6 (9). - С. 114 - 117.
5. Шалупаев С.В., Шершнев Е.Б., Никитюк Ю.В. Комбинированное лазерное термораскальвание // Лазерная физика и спектроскопия: Материалы IV междунар. конф.: В 2 ч. - Гродно: ГрГУ, 1999. Ч. 2.-С. 177- 179.
6. Обработка методом лазерного термораскальвания керамических и стеклянных изделий трубчатой формы / С.В. Шалупаев, Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк и др. // Ceramics. Polish ceramic bulletin. - 2003. - V. 79. - P. 115-120.
7. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. - М.: Наука, 1993. - 187 с.
8. Пат 683 РБ, МПК С 03 В. Установка для лазерного термораскальвания хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалупаев, Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк. Заявка и 20010292; Заявл. 10.12.2001; Оpubл. 30.09.2002.
9. Новацкий В. Теория упругости. - М.: Мир, 1975. - 872 с.
10. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. - Л.: Машиностроение, 1983.-212 с.
11. Кикоин И.К., Аверин В.Г., Аронзон Б.А. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. - М.: Атомиздат, 1976. - 1008 с.